

基于 DBZP 方法的微弱 GPS 信号快速捕获

焦瑞祥, 茅旭初

(上海交通大学仪器科学与工程系, 上海 200240)

摘要: 卫星信号的捕获是 GPS(Global Positioning System) 接收机信号处理的首要任务. 在微弱信号环境下, 传统的方法难以实现信号捕获的准确性和快速性. 本文的新方法将 P(Y) 码捕获技术应用于微弱 GPS 信号的 C/A 码捕获, 并针对连续积分数据跨越多个导航电文数据位的情况给出解决方案. 仿真结果表明, 此方法能够较好地捕获到信噪比低至 15dB Hz 的信号, 同时确保较少的运算量和较高的灵敏度.

关键词: 全球定位系统; 双块零拓展; 微弱信号处理; 快速捕获

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)12-2285-05

Double Block Zero Padding-Based Fast Acquisition of Weak GPS Signal

JIAO Rui xiang, MAO Xu chu

(Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Signal acquisition is the first work of signal processing in Global Positioning System receiver. However, it is difficult to get the accuracy and fast acquisition of the GPS signal by traditional methods when the signal is very weak. The paper presented a new method which applies the technology of acquisition of P(Y) code in the acquisition of C/A code, and gives resolutions account for the problems brought from the data spanning multiple data bits. The simulation results show that, signal which carrier noise ratio is low to 15dB Hz could be well acquired by the new method, with fast acquisition speed and high sensitivity.

Key words: global positioning system (GPS); double block zero padding (DBZP); weak signal processing; fast acquisition

1 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)近年来已经得到越来越广泛的应用. 美国政府取消了全球定位系统(Global Positioning System, GPS)^[1]的选择可用性(Selective Availability, SA)加密政策之后, GPS 民用接收机的发展得到了很大的提升; 欧洲和俄罗斯等也都制定了加快发展全球卫星导航技术的政策与计划; 我国也根据国情提出了发展自己的卫星导航系统计划. 随着这项定位技术发展的不断深入, 用户对其使用要求也越来越高, 无盲区、高灵敏度的定位与导航成为目前最新的技术发展方向.

普通 GPS 接收机在无遮蔽情况下可以接收到四颗以上的卫星信号, 满足定位的理论要求实现定位解算. 但是在特殊情况下, 例如在高楼林立的城市中心, 林木遮挡的森林公路, 特别是在隧道和室内环境的情况下, 由于卫星信号非常微弱, 信噪比(Carrier Noise Ratio, C/No)通常都在 34dB-Hz 以下, 应用传统接收机很难有效捕获到卫星信号, 导致无法正常定位.

在 GPS 信号中, P(Y) 码的基码速率是 C/A 码的十倍, 因此在 P(Y) 码的捕获过程中采样频率更高, 单位时长的采样点数更多, 这与微弱 GPS 信号 C/A 码捕获过程中需要处理大量的数据相似. 本文针对微弱 GPS 信号捕获难题, 提出了将 P(Y) 码捕获技术应用于微弱 GPS 信号的 C/A 码捕获, 并针对大批量处理数据时可能遇到的导航电文数据位跳变给出了具体的解决方案, 在相比传统长序列相关法运算量显著减少的情况下, 为后续信号跟踪环节提供准确的多普勒频移和伪码相位.

2 微弱 GPS 信号的捕获

GPS 信号处理分为捕获、跟踪、导航电文解码三个阶段^[2]. GPS 系统采用码分多址(CDMA)扩频通讯体制, 对于 CDMA 扩频系统来说, 捕获就是使本地复现码和接收码的相位差小于一个码元宽度, 且收发码时钟频率基本一致, 同时使载波相互对准, 实现输入信号与本地信号的粗同步, 并得到粗同步时的本地复现码移动相位和载波多普勒频率, 为后续信号跟踪提供初始化信息. 一旦卫星信号被捕获, 就可以利用载波环路和伪码环路进

收稿日期: 2007-08-25; 修回日期: 2008-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40674002); 2005 年度教育部回国留学人员启动基金

行跟踪, 实现本地复现信号对输入信号的精确同步, 使相关输出始终处于最大状态. 导航信息解码主要是从经调制的信号中解调出导航数据.

微弱 GPS 信号的捕获需要处理大量的数据, 进而增大信号的捕获概率. 如图 1 所示, 基于单纯长序列相关的捕获方法将接收到的信号与本地接收机复现的 C/A 码进行大规模相关运算, 并根据相关值的峰值是否超过预设检测门限作为捕获的判据. 虽然此方法可以捕获到较微弱的信号, 但是随着信号的减弱处理数据的增加, 长序列相关法的运算量陡增, 导致捕获时间延长, 不利于后续的跟踪环节.

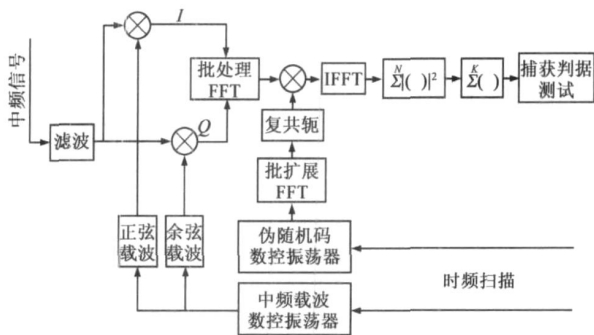


图1 基于单纯长序列相关的捕获方法

2.1 基于 DBZP 的捕获方法

双块零拓展 (Double Block Zero Padding, DBZP) 方法^[3,4]针对连续积分将普通循环卷积和后积分傅立叶变换整合来产生不同的多普勒频移搜索. 算法结构如图 2 所示, 具体过程如下:

Step1: 根据多普勒频移搜索精度 D_{bin} 的需要, 将 N

个 C/A 码周期时长的基带信号分成 $N \times N_b$ 个 N_s 长度的子块, 同时将一个周期的复现 C/A 码分成 N_b 个 N_s 长度的子块, 其中, $D_{bin} = \frac{1000}{N_b}$ Hz.

Step2: 将基带信号相邻的两个子块组合成一个 $2 \times N_s$ 长度的双块, 在每个复现的 C/A 码子块后用零元素拓展成一个长度为 $2 \times N_s$ 的双块, 然后将对应的双块进行相关运算. 将得到的相关序列结果的第一个子块有用信息保存.

Step3: 调制在信号中的 C/A 码是周期性重复的, 因此后续的 $N-1$ 个周期的基带信号依前述方式分别与对应的复现 C/A 码双块进行相关运算并保存有用信息.

Step4: 将得到的 $N \times N_b$ 个相关子块结果对应元素进行时频域转换并取得转换后每个元素的模值大小, 若有元素模值大于预先设定的阈值门限即认为信号被捕获, 此元素对应的位置标定了 C/A 码相位与多普勒频率.

Step5: 若没有元素模值大于预先设定的阈值, 保持基带信号不变, 将复现的 C/A 码循环移动一个子块长度并依前述方式进行双块相关并保存有用信息子块. 如此得到连续积分矩阵模块 I_c .

Step6: 读取新的 N 个 C/A 码周期时长的基带信号, 重复步骤 Step1 至 Step5 得到 K 个连续积分矩阵模块, 将其对应元素累加得到非连续积分矩阵模块 I_{inc} . 最大模值元素的位置标定了伪码相位和多普勒频率, 若没有元素模值超过预设门限, 则认定信号不存在.

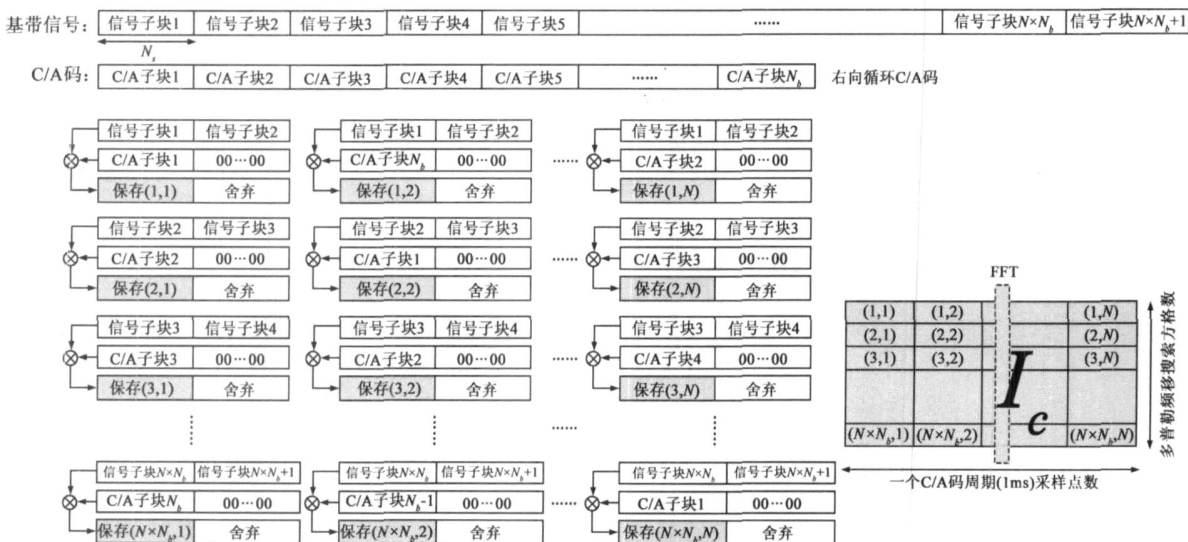


图2 基于DBZP的捕获方法

为了保证伪码相位出现在正确的位置, Step5 中循环移动 C/A 码的方向需要同双块相关运算中 C/A 码子块移动方向一致. 实际接收机工作时随时间后移接收

新信号的工作模式相当于信号左移, 本文中为模拟上述工作模式并考虑到方便性将双块相关运算中 C/A 码子块移动方向与 Step5 循环移动 C/A 码的方向都设定

为右向移动. 本文中降频后中频信号的载波频率 f_{IF} 为 1.25MHz, 采样频率 f_s 为 4.096MHz, 一个 C/A 码周期的采样点数为 4096. 根据卫星相对于接收机的速度将多普勒频移搜索范围设定为预期中频上下 ± 8 kHz 带宽内可满足微弱信号接收机的定位要求^[5], 因此频率搜索幅度 f_{cov} 为 16kHz. 在积分矩阵模块中最大模值元素出现位置所对应的列坐标就是基带信号的 C/A 码码相位, 对应的行坐标标定了多普勒频率的大小, 具体如下:

$$f_d = \begin{cases} f_{IF} + (\text{row} - 1) \times D_{bin}, & \text{row} \leq N \times N_b / 2 \\ f_{IF} + (\text{row} - 1) \times D_{bin} - f_{cov}, & \text{row} > N \times N_b / 2 \end{cases}$$

在连续积分处理的数据有多个导航电文数据位时, 符号变化引起数据位的跳变将严重影响捕获能力以及捕获的准确性. 为此, 对数据位符号进行屏蔽剥离. 若连续积分处理的数据有 N_{db} (number of data bits) 个数据位, 则影响信号捕获的符号组合方式有 $2^{N_{db}-1}$ 种, 因此利用这 $2^{N_{db}-1}$ 种符号组合排列分别乘以 I_c 中对应的数据位行区段, 符号屏蔽正确的具有最大相关模值. 由于这种屏蔽数据位符号的组合个数随着 N_{db} 的增加呈级数增长, 因此 N_{db} 的选择不易过大.

2.2 导航电文数据位跳变边沿检测

在信号捕获过程中非连续积分之前的取模处理使得噪声均值非零而导致增益的平方损失, 增加连续积分时间可以有效地减小平方损失^[5]. 但是对大量数据进行连续积分处理会存在跨越导航电文数据位的问题, 例如 N 取值较大, 超过一个数据位 (20ms) 时长, 进行处理的数据段将会跨越数据位, 如果数据位发生跳变, 将导致所处理数据信息的抵消. 图 3 中上图示意了数据位跳变的情况, 在时刻 280ms 和 300ms 等五个位置有数据位跳变存在. 在跳变位置最坏的情况下, 如读取的数据从 270ms 时刻开始, 并且 N 值为 20, 那么有用信息因数据位跳变而完全抵消, 导致处理数据的结果中只有噪声, 这样在最坏的情况下将不可能检测到卫星信号.

为避免该情况, 在信号捕获过程中对数据位跳变进行检测, 确定数据位边沿以便从跳变边沿开始读取处理数据. 最优位同步法^[6]可以较好地检测到导航电文数据位跳变边沿. 在接收到的数据中, 设连续积分处理数据的长度为一个数据位时长, 即 20 个 C/A 码周期的时长, 每处理一次数据将读取数据的位置后移一个 C/A 码时长, 这样得到 20 个相关结果. 这 20 个结果中只有一个没有跨越数据位跳变, 因此相关峰值最大的结果所对应的读取数据位置标定了数据位的跳变位置. 后续处理数据时以此位置起每次处理数据的长度都为数据位时长, 即可消除数据位跳变的影响. 图 3 中

下图所示为连续积分处理数据为一个数据位时长, 即 $N = 20$ 非连续积分为 $K = 5$, 信噪比为 $C/N_0 = 23$ dB-Hz 所对应的数据位边沿跳变检测结果.

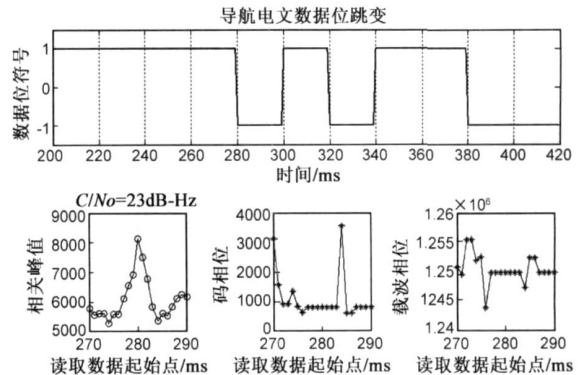


图3 导航电文数据位跳变检测

上图中, 在所处理数据跨越跳变抵消有用信息较少的情况下, 即开始读取处理数据的位置为 278ms - 282ms 时, 能够较好的检测到所处理数据的 C/A 码码相位以及载波多普勒频率; 当所处理数据跨越跳变抵消有用信息较多的情况下, 相关峰值快速减小, 并且不能获得准确的 C/A 码码相位和载波多普勒频率. 结果显示, 相关值最大的结果所对应的读取数据位置准确标定了数据位的跳变位置.

2.3 运算速度

运算速度在微弱 GPS 信号的捕获过程中一直是关注的要点. 新捕获方法的运算量比传统单纯长序列法有较大减少, 运算速度得以较大提高.

为了缩短搜索时间, 通常采用基于 FFT 的相关法来提高运算速度^[7,8]. 对本文提出的捕获方法以及传统单纯长序列法运算速度的估计是建立在以下基础上的, 对于 n 点复数傅立叶变换, 其运算量包含 $(n/2) \log_2(n)$ 个复数乘法运算和 $(n) \log_2(n)$ 个复数加法运算. 基于 DBZP 方法的信号捕获将基带信号和复现的 C/A 码分成短的子块进行相关运算在实现上更加方便, 并且在多普勒频率搜索上不需要复现多个载波频率进行解调运算, 因此运算量大为减少. 但是由于本文算法的固有复杂性, 在连续积分时间处理数据较少时并没有优势, 甚至比普通长序列法运算速度差, 本算法的优势表现在为捕获微弱信号增加连续积分时间处理数据较多时. 表 1 显示了两种方法在多普勒频率搜索精度为 50Hz 时的运算速度对比, 其中, 单纯长序列法是经过优化的多普勒频率搜索方法, 即首先以较大的多普勒频率方格搜索, 搜索到后再以小的多普勒频率方格进行精确搜索. 尽管单纯长序列法经过优化处理, 而本文新提出的搜索方法在连续积分处理数据增加时运算速度优势明显, 在连续积分时间为 60ms 时, 运算速度为

单纯长序列法的 3 倍以上。

表 1 运算速度对比

搜索精度: 50Hz		(运算量 $\times 10^7$)					
连续积分时间		10ms	20ms	30ms	40ms	50ms	60ms
实数乘法	单纯长序列	6 2337	12. 702	19. 411	26 277	33. 259	40. 334
	DBZP	7. 7668	8. 5369	9. 2724	10 111	11. 101	12. 265
运算次数	运算量	0 8026	1. 4879	2. 0934	2. 5987	2. 9960	3 2887
	改进倍数						
实数加法	单纯长序列	8 5101	17. 434	26 720	36 240	45 935	55. 770
	DBZP	10. 327	11. 470	12 561	13 807	15 279	17. 013
运算次数	运算量	0 8240	1. 5200	2. 1272	2. 6247	3. 0063	3 3782
	改进倍数						

3 仿真结果

通过拟合 GPS 接收机实际接收到的导航信息和伪距, 再加入信号噪声, 构造出不同信噪比的数字信息以供仿真使用。首先模拟降频结束后的中频载波信号; 然后依次向载波上调制 C/A 码和导航数据信息; 在设定信号的幅值固定为单位量的情况下, 根据信噪比的计算公式反推出噪声的幅值, 最后加入噪声。

在微弱 GPS 信号捕获的现实应用中, 捕获之前不能确切判断所要捕获信号的信噪比, 对于利用噪声统计来设定捕获判据阈值的方法, 在信噪比变化较大的

环境中不能得到较为通行的应用。微弱 GPS 信号捕获过程中最大的虚警概率因素来源于相关值旁瓣的影响^[1], 并且在微弱信号情况下多路径效应所引起的反射信号捕获也造成了干扰相关峰值, 因此这里采用了将信号次大相关峰值与最大相关峰值做比较的方法, 若次大相关峰值与最大相关峰值的比值低于某一数值, 就认为信号被准确捕获, 这里选取捕获判据阈值为 70%。本文同时附加了处理数据结果的最大相关值与相关均值的比值以增加数据的可读性。在下文中, 用 STF (Second to First) 来表示次大相关峰值与最大相关峰值的比值, 用 MTM (Maximum to Mean) 来表示最大相关值与相关均值的比值。采用不同信噪比的信号进行仿真, 并比较其结果。

图 4 描述了连续积分时间为一个数据位时长, 即 $N = 20$ 个 C/A 码周期的时长, 非连续积分时间为 $K = 5$ 个数据位时长的捕获结果。结果显示, 随着信噪比的降低, 噪声的均值越来越高, 且相关旁瓣的值已经开始干扰捕获的准确性, 在信号的信噪比低至 19dB-Hz 的时候, 相关旁瓣的峰值已经超过最大相关峰值的 75%, 尽管最大相关峰值准确标示了码相位的值, 但是捕获的虚警概率较大, 不能确认捕获成功。

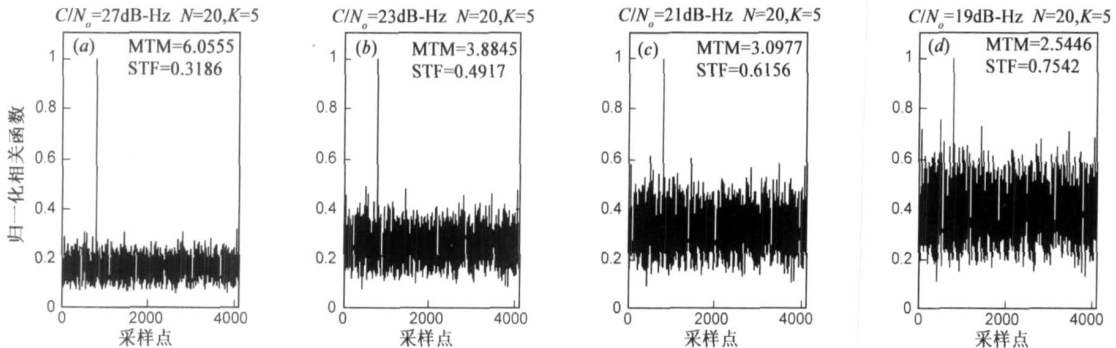


图 4 单数据位时长连续积分捕获

图 5 描述了连续积分时间增加至 $N_{db} = 3$ 个数据位, 非连续积分时间为 $K = 5$ 共计 15 个数据位时长的捕获结果。图 5(a)、5(b) 分别与图 4(b)、4(d) 对比表明, 在增加连续积分时间的情况下, 次大相关峰值得到

明显的抑止。结果显示, 在处理数据时长不超过 300ms 的情况下, 此方法可以较好的捕获到信噪比低至 $C/N_0 = 15\text{dB-Hz}$ 的 GPS 信号。

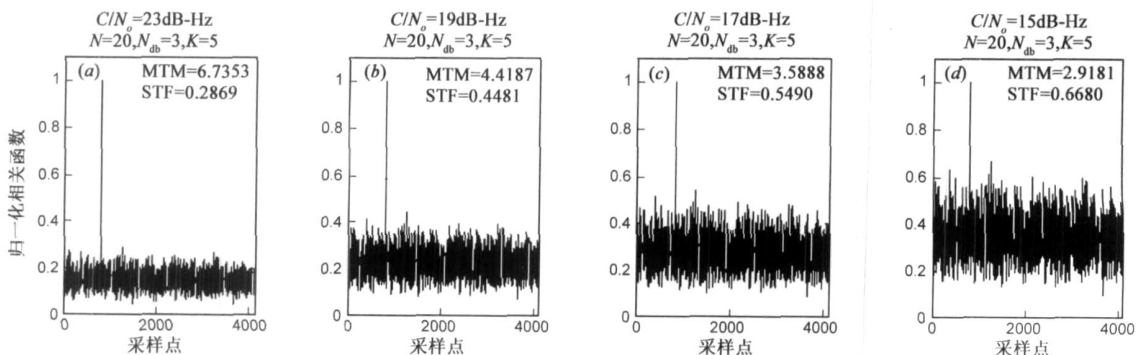


图 5 多数数据位时长连续积分捕获

上述仿真结果表明, 采用新的数据处理捕获方法, 在运算量减少的情况下处理更多的数据可以成功捕获低信噪比的 GPS 信号, 为高灵敏度 GPS 接收技术的实现提供保证. 显然, 采用新的捕获方法在捕获恶劣环境下低信噪比卫星信号时的运算速度和能力都比传统单纯长序列捕获方法有了较大改善.

4 结语

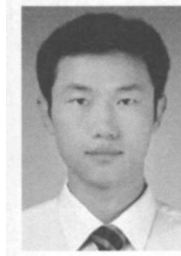
本文介绍了一种新的基于 DBZP 的微弱 GPS 信号捕获方法, 并从原理和仿真结果上与传统单纯长序列捕获方法进行了比较. 本文研究的重点是微弱信号的精确捕获, 以期给后续的卫星信号跟踪和导航电文解码提供快速准确的初始化信息. 仿真结果表明, 在捕获过程的时间不超过 300ms 并显著减少运算量的情况下, 新的捕获方法可以较好的捕获到信噪比低至 15dBHz 的信号, 这将可以有效地进行室内 GPS 定位的信号处理.

参考文献:

- [1] Kaplan E D. Understanding GPS Principles and Applications [M]. Boston: Artech House, Inc, 1996.
- [2] Misra, P Enge. Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance (Second Edition) [M]. Lincoln, MA: Ganga Jamuna Press, 2006. 431– 549.
- [3] David M Lin, James B Y Tsui, Dana Howell. Direct P(Y)-Code Acquisition algorithms for software GPS receivers [A]. Karen Van Dyke. Proceedings of ION GPS '99[C]. Nashville TN: The Institute of Navigation, 1999. Part I, 363– 368.
- [4] David M Lin, James B Y Tsui. Comparison of acquisition methods for software GPS Receiver[A]. Karen Van Dyke. Proceedings of ION GPS 2000[C]. Salt Lake City UT: The Institute of Navigation, 2000. 2385– 2390.

- [5] James B Y Tsui. Fundamentals of Global Positioning System Receivers a Software Approach [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005. 34– 38, 230– 235.
- [6] Bradford W Parkinson, James J Spilker Jr. Global Positioning System: Theory and Applications Volume I[M]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996. 395– 396.
- [7] Zhu Xuefen, Chen Xiyuan, Li Zigang. Architecture design of GPS software receiver and implementation of its acquisition algorithm with fine frequency estimation[J]. Journal of Southeast University [English Edition], 2008, 24(1): 38– 41.
- [8] Yang C. Fast code acquisition with FFT and its sampling schemes[A]. Karen Van Dyke. Proceedings of the 1996 National Technical Meeting [C]. Kansas City: The Institute of Navigation, 1996. 1729– 1734.

作者简介:



焦瑞祥 男, 1982 年 10 月出生于河南省卫辉市. 现为上海交通大学导航、制导与控制专业硕士研究生, 主要从事高灵敏度 GPS 接收机信号处理方面的研究.

Email: rxjiao@sjtu.edu.cn



茅旭初 男, 1969 年 12 月出生于江苏省张家港, 上海交通大学副教授, 主要从事高精度单机 GPS 定位、微弱 GPS 信号处理、GPS 软件接收机等方面的研究. Email: maoxc@sjtu.edu.cn